

*А. Г. НАРЫЖНЫЙ, М. Е. ТАРАНЕНКО***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Проведен совместный анализ результатов математического моделирования и технологических экспериментов в сопоставимых условиях, предполагающих действие на заготовку двух электрических разрядов со смещением во времени начала в двух погружных камерах. Адекватность модели проявляется в отражении таких важных особенностей как самопроизвольный переход волнового движения элементов в колебательный, характер колебательного движения заготовки, потеря устойчивости формы и складкообразование, развитие и взаимодействие различных парогазовых полостей. Методика численной реализации модели обеспечивает исследование процессов при очень высокой степени деформации элементов технологической системы, что позволяет использовать модель и методику для исследования и параметрической оптимизации технологического процесса штамповки и технологической оснастки в соответствии с различными целевыми функциями. Отмеченные количественные различия параметров, определяемых посредством моделирования и технологического эксперимента обусловлены сложной взаимосвязью разнообразных процессов, а также различием значений параметров модели и установки.

Ключевые слова: электрический разряд в жидкости, математическое моделирование процесса штамповки, ударные волны, деформация листовой заготовки, пластичность, импульсная нагрузка

*О. Г. НАРИЖНИЙ, М. Є. ТАРАНЕНКО***ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСА ПОСЛІДОВНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Проведений сумісний аналіз результатів математичного моделювання та технологічних експериментів в близьких умовах, що припускають дію на заготовку двох електричних розрядів із зсувом початку за часом у двох занурених камерах. Адекватність моделі виявляється у відображенні таких важливих особливостей як спонтанний перехід хвильового руху елементів до коливань, характер коливань заготовки, втрата стійкості форми та складкоутворення, розвиток та взаємодія різних паро-газових порожнин. Методика чисельної реалізації моделі забезпечує дослідження процесів за умов дуже високої деформації елементів технологічної системи, що дозволяє використовувати модель та методику для дослідження та параметричної оптимізації технологічного процесу штампування і технологічного оснащення відповідно різних цільових функцій. Відзначені якісні відмінності параметрів, які визначаються за допомогою моделювання та технологічного експерименту, обумовлені складним взаємозв'язком різноманітних процесів, а також початковою різницею параметрів.

Ключові слова: електричний розряд в рідині, математичне моделювання процесу штампування, ударні хвилі, деформація листової заготовки, пластичність, імпульсне навантаження

*F. G. NARYZNY, M. YE. TARANENKO***INVESTIGATION OF THE PROCESS OF SEQUENTIAL DEFORMATION OF THE SHEET BILLET UNDER ELECTROHYDRAULIC LOADING**

It is performed joint analysis of simulation and technological experiment results in comparable condition, expecting action on blank up two electric charges with time lag of beginning in two submersible cameras.

Adequacy of model reveals itself such important particularities in reflection as spontaneous turning the wave motion element to oscillatory, nature of the oscillatory moving the blank, buckling and folding, development and interaction different vapour-gas cavity. The numerical realization methods of models provide the study of the processes with very high degree of deformation of element technological system element that allows to use the model and methods for study and parametric optimization of the technological stamping process and technological rig in accordance with different target function. The noted distinctions of degree parameters, which are defined by means of simulation and technological experiment are conditioned by complex intercoupling of the varied process, as well as difference of importance parameters of models and installation.

Keywords: electrical discharge in a liquid, mathematical modeling of the stamping process, shock waves, deformation of a sheet stock, ductility, impulse load

Введение. Электрогидравлический эффект (ЭГЭ) с середины прошлого века успешно применяется для штамповки крупногабаритных тонкостенных деталей [1]. В результате технологических экспериментов и опытно-промышленного применения изучено влияние технологических параметров на протекание процессов в пространстве-времени, выявлены свойства и особенности процессов, предложены и успешно использованы приемы параметрического управления процессом электрогидравлической штамповки (ЭГШ). Однако достичь оптимального соотношения параметров техпроцесса ЭГШ для полного использования положительных возможностей ЭГШ с применением лишь экспериментального подхода практически не удается из-за его большой трудоемкости, материалоемкости, стоимости и длительности.

Применение альтернативного подхода к исследованию и оптимизации процессов,

математического моделирования, требует разработки и обоснования адекватной модели, а также методики ее реализации. Эти методические вопросы необходимо решать в комплексе, учитывая противоречивые особенности механического поведения элементов: подвижность вязкой жидкости, очень высокую деформируемость и подвижность газоплазменной фазы, упруго-пластический характер деформирования заготовки, импульсный характер возмущения, а также ударно-контактный характер взаимодействия элементов.

Известны несколько математических моделей описывающих процесс штамповки при ЭГ-нагрузении, например [6–8], где использованы упрощенные модели деформирования плоских заготовок под действием ЭГЭ без учета действия ПГП, как отдельного элемента системы. Действие ПГП на жидкость отображается посредством

импульсного давления, которое меняется во времени по форме полусинуса (параметры функции определяются экспериментально). Заготовки имитировались упруго-пластичной моделью со скоростным упрочнением по Джонсону-Куку [9].

Для обоснования адекватности оригинальной модели и точности ее реализации целесообразно применить методику для анализа хорошо изученного экспериментальным методом объекта, что позволяет учесть действие всех факторов в совокупности и взаимосвязи.

Цель работы – обоснование методического подхода для сокращения времени и расхода ресурсов при технологической подготовке производства крупногабаритных листовых деталей с высоким качеством и низким уровнем вредной технологической наследственности.

Задачи работы:

- совместный анализ результатов моделирования и технологических экспериментов;
- обоснование адекватности возможностей методики моделирования.

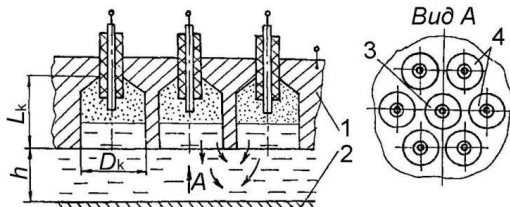


Рис. 1 – Принципиальная схема многоразрядного блока [1]: 1 – разрядная камера; 2 – предмет обработки; 3 – камера, в которой производится основной разряд; 4 – шесть камер, в которых производятся дополнительные разряды; точками обозначена зона ПГП

Для решения поставленных задач была использована следующая установка (рис. 1). В 2-х полостях жесткой плиты происходит два электрогидравлических (ЭГ) разряда. При этом за короткий промежуток времени выделяется определенное количество тепловой энергии. Она приводит к образованию парогазового пузыря (ПГП) в жидкости, которой заполняют полости, пространство между плитой и предметом обработки. В первые моменты времени ПГП расширяясь в направлении открытого торца полости разгоняет находящуюся перед ним жидкость в пределах полости. Скорости перемещения жидкости велики и от границы ПГП и жидкости отслаивается ударная волна (или пакет ударных волн), формирующая и направляющая поток жидкости в осевом направлении. После выхода ударных волн пределы полости движение жидкости поддерживается расширяющимся ПГП. Поток жидкости в пределах пространства между жесткой плитой и предметом обработки образует импульсную затопленную струю жидкости, перемещающуюся в сторону предмета обработки. Математическая модель такого процесса описана ранее в работе [2].

Отличие рассматриваемого процесса заключается в том, что ЭГ-разряд происходит в двух соседних полостях не одновременно, а некоторым

смещением по времени, соизмеряемым с длительностью процесса, проходящего в исследуемом пространстве.

Предмет обработки представляет собой вязко-упруго-пластически деформируемую тонкую пластину. Места ее опоры находятся далеко от зоны деформации, что позволяет рассматривать свободное деформирование пластичны.

Начальные условия моделирования следующие: расстояние между осями камер – 60 мм, диаметр камер – 40 мм, величина зазора между торцом камер и плоскостью предмета обработки – 40 мм. Электрические параметры разрядной цепи: напряжение разряда – 25 кВ, емкость батареи конденсаторов – 42 мкФ, индуктивность разрядной цепи – 3 мкГн, активное среднее значение сопротивления разрядного промежутка – 0,04 Ом. Т. о. запасаемая электрическая энергия равна 13,125 кДж, а длительность первого полупериода разрядного тока, согласно [1], принимается равной 134 мкс (при принимаемом значении количества энергии, выделившейся за первый полупериод по отношению к общей энергии 0,8).

Рассматривается процесс деформирования листовой заготовки диаметром 320 мм в вытяжное кольцо диаметром 252 мм. Толщина заготовки 1,0 мм. Условно считается, что вытяжки фланца заготовки не происходит. Материал заготовки – упруго-пластический алюминиевый сплав со степенным законом упрочнения вида $\sigma = Ae^n$, где $A=463$ МПа, $n=0,122$. Начальное значение предела текучести 2100 МПа, плотность 2700 кг/м³. Передающая среда – вода плотностью 1000 кг/м³, с объёмным модулем сжатия 22500 МПа, давлением кавитации 10⁴ Па. Среда ПГП – идеальный газ с показателем адиабаты 0,26 и плотностью при нормальных условиях 1,25 кг/м³.

Условиями моделирования предусмотрено, что ЭГ-разряды производятся в 2-х соседних камерах со сдвижкой по времени в диапазоне 10...550 мкс.

На первых этапах моделирования рассмотрена физическая (механическая) картина формоизменения плоской заготовки. На рис. 2 показано развитие ПГП в двух соседних камерах, в левой из которых ЭГ-разряд происходит с задержкой по времени относительно первого на 350 мкс или в относительном значении времени

$$E = \frac{t}{\tau_1} = 2,61$$

Здесь τ_1 – длительность первого полупериода ЭГ-разряда. Картина формоизменения ПГП после его выхода за пределы камеры (ее торца) показана «на просвет» в моменты времени $\bar{t}^* = 0,57; 0,57; 2,28; 4,57; 8,57$ относительно времени смещения второго разряда.

В первые моменты времени развивающийся ПГП имеет цилиндрическую формулу с округлой вершиной. В нем преобладают осевые скорости, а радиальные расширения минимальны. Это благоприятствует большему КПД передачи энергии

заготовке. В момент времени $\bar{t}^* = 0,57$ заготовка имеет волны, которые формируют направление передачи запасенной энергии. По мере приближения ПГП к заготовке ее осевая симметрия нарушается, и полость принимает грибовидную форму ($\bar{t}^* = 2,28$).

Развитие второй полости (левой), в которой концентрация энергии больше, чем в правой полости, приводит к смещению правой полости вправо и пластическая деформация зоны заготовки, находящейся под ней, увеличивается по сравнению с аналогичной зоной под правой полостью. Это, скорее всего, объясняется уже сформированным кинетическим потоком в передающей среде и заготовке.

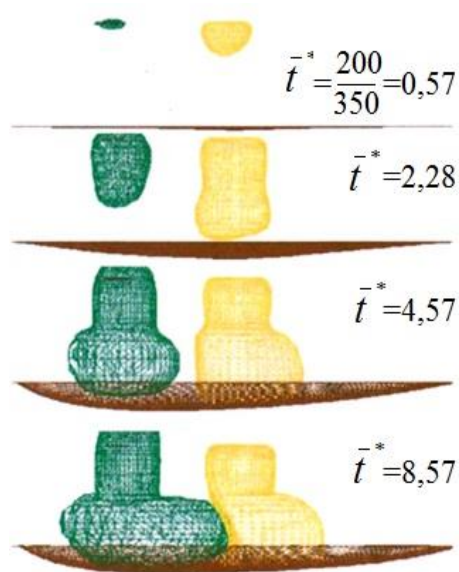


Рис. 2 – Последовательное изменение формы ПГП и заготовки в моменты времени $\bar{t}^* = 0,57; 2,28; 4,57; 8,57$ (результаты моделирования). Точки на изображениях объектов свидетельствуют о проникновении сеток одного объекта моделирования в область другого объекта



Рис. 3 – Теневые кадры формы заготовки при локальном нагружении

На окончательных этапах процесса прогиб заготовки имеет максимальное значение под левой полостью (где более позднее выделение энергии) и монотонно изменяются по радиусу. Этот вывод получен при относительно небольшом расстоянии между камерами, равном 1,5 диаметра камеры. Экспериментально, при относительном расстоянии 2,2 получено, что под каждой камерой образуются две отдельные пуклевки с участком отрицательной кривизны между ними (рис. 3, левый кадр). Локальное

нагружение на участке между пуклевками деформирует этот участок с единственным максимумом (рис. 3, правый кадр).

Следует отметить, что максимальное относительное увеличение объемов ПГП равно ~ 32320 единиц для правой полости и ~ 37940 единиц для левой. Возможность расчета в условиях столь больших деформаций обусловлено применяемым методом ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian).

Теневая картина развития и взаимодействия струи жидкости, выходящей из разрядной полости под действиями ЭГ-разряда, показана на рис. 4. В этом случае производился «медленный» разряд с энергией значительно меньшей, чем в условиях моделирования. На последовательных кадрах с шагом 96 мкс видно, что на выходе струя имеет цилиндрическую форму (верхний ряд кадров) по мере приближения к плоскости жесткой преграды она начинает расширяться и у нее появляются радиальные составляющие скорости (средний ряд кадров). После смыкания струи с поверхностью преграды (нижний ряд кадров) радиальные составляющие скорости увеличиваются. Струя как-бы прилипает к преграде и растекается по ней, но осевая симметрия сохраняется.

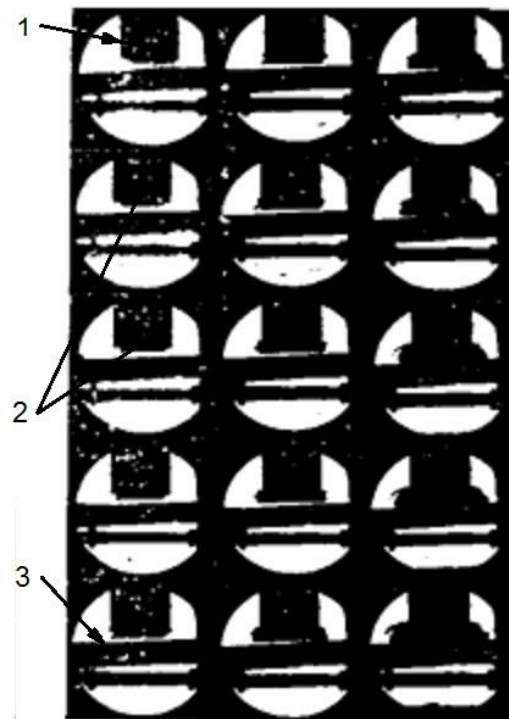


Рис. 4 – Последовательное перемещение границы ПГП к заготовке: 1 – корпус разрядной камеры; 2 – границы ПГП; 3 – жесткая преграда

В целом, модельное поведение струи на начальном этапе процесса соответствует экспериментальной картине процесса.

Далее было исследовано формоизменение листовой заготовки под действием локально приложенной нагрузки. Наибольшие значения прогибов наблюдаются в зоне влияния вне центрального импульса и равно ~ 20 мм. Изолинии прогибов имеют вид овалов. Наибольшие значения

пластических деформаций и интенсивности напряжений наблюдаются в зонах, прилегающих к перетяжному ребру матрицы.

На рис. 5 показаны цветовые картины распределения осевых перемещений оболочки (м), справа даны цветовые шкалы, сверху отмечены моменты времени (мс). Перемещения, в основном, отрицательны, только лишь на фланце они практически неизменны. На левом рисунке видно, что совокупное действие волн давления приводит к локальному деформированию, имеющему вид вытянутой области. Дальнейшее деформирование заготовки происходит под действием импульса давления жидкости, имеющего пространственно-распределенный характер, что приводит более равномерному распределению перемещений в радиальных направлениях. Наконец, правый рисунок показывает окончательное распределение перемещений, область максимальных перемещений получила почти круговую форму с центром, смещенным в сторону оси второй камеры. Отметим на втором и третьем рисунках волнистый характер картины распределения на периферии, который представляет образование складок. Все картины

имеют симметричный характер относительно горизонтальной линии, проходящей через оси обеих погружных камер. Отмеченные особенности деформирования наблюдаются в реальности.

На рис. 6 показаны цветовые картины распределения осевых скоростей оболочки. На левом рисунке видно, что все скорости в центральной части оболочки направлены вниз, а само распределение неоднородно, область наибольших скоростей имеет вытянутую форму. Результатом этой особенности является распределение перемещений, показанное на рис. 5, слева. На среднем рисунке отмечено начало неоднородности движения, максимальные скорости наблюдаются в двух симметричных отдельных областях. На периферии поле скоростей сильно неоднородно, что приводит к образованию складок. На правом рисунке отмечено начало колебаний заготовки, в пяти синих отдельных участках оболочка движется вниз, а в помеченном красным участке – вверх. Отдельность участков движения объясняется сформировавшимися гофрами, которые обуславливают переменную жесткость оболочки в окружном направлении.

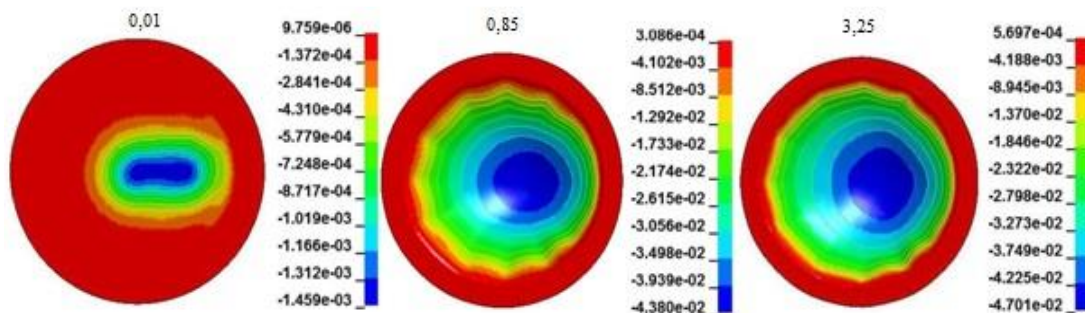


Рис. 5. Картины распределения осевых перемещений оболочки

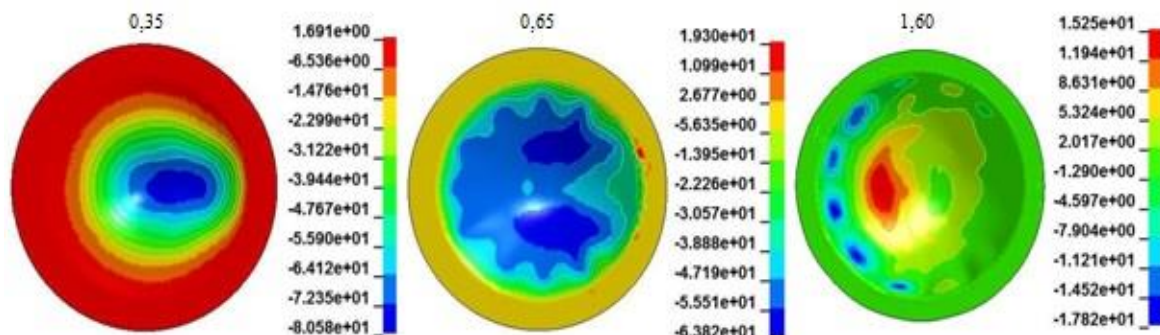


Рис. 6 –

Образование складок на периферийной области примыкающей части заготовки вызвано большими пластическими деформациями в ней, чем в центральной части (рис. 7). В результате площадь поверхности заготовки на периферии увеличивается и

под действием нагрузки каждая материальная точка с диаметром D перемещается на меньший диаметр d (на рис. 7 показано стрелкой). Вследствие этого в периферийной зоне образуется сжимающее тангенциальное окружное напряжение, приводящие к

потере устойчивости формы заготовки и образованию складок (рис. 8). Они наблюдаются как при вытяжке, так и при формовке. Более интенсивное складкообразование проходит при деформировании более тонкостенных заготовок. На этапах до штамповки складки растягиваются, но это происходит при определенной форме готовой детали. Для исключения неровности поверхности детали нужно устанавливать соответствие формы детали и последовательности деформирования.

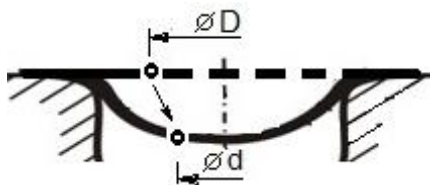


Рис. 7 – Схема перемещения материальной точки заготовки при штамповке дна

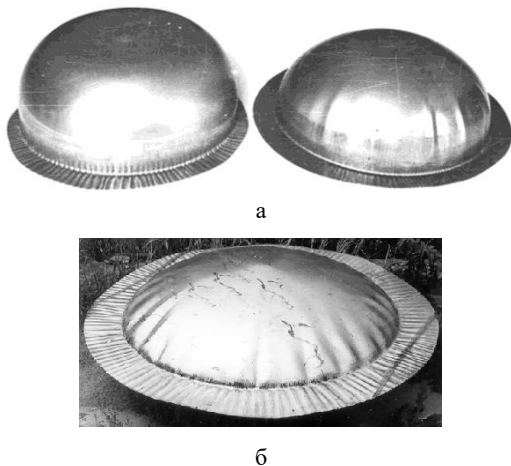


Рис. 8 – Характерные формы отштамповок на промежуточных этапах формоизменения:

- а – материал 08 кп, диаметр 303 мм, толщина 0,8 мм; слева готовая деталь, справа – промежуточный этап вытяжки;
- б – дно диаметром ~ 1,0 м, толщиной 1,5 мм, сталь 12 х 18 Н9Т

На рис. 9 показаны расчетные временные зависимости осевых скоростей отдельных точек заготовки, которые сравнимы с аналогичными

экспериментальными зависимостями (рис. 10) для разных материалов деформирования в этих зонах. Наибольшее значение скоростей наблюдаются в зонах действия нагружающих импульсов.

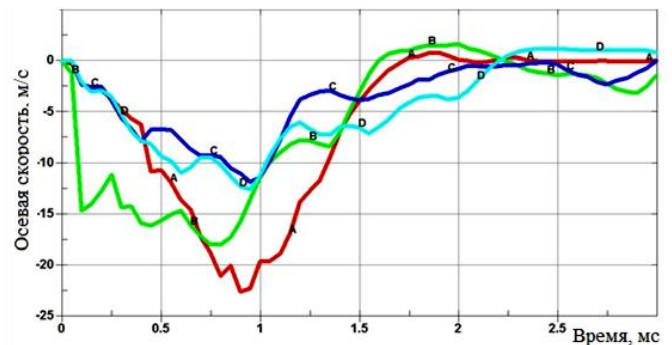


Рис. 9 – Расчётные зависимости осевых скоростей точек заготовки: А – в центре вне центрального импульса; В – в центре первого центрального импульса; С – в точке диаметрально противоположной В; D – в точке на диаметре, перпендикулярном АВ

Расчетные кривые отражают колебательный характер процесса деформации заготовки особенно с начала процесса, особенно до момента 1,5 мс. Точки С и D колеблются дольше, что, скорее всего, связано с упругим характером

Экспериментальные кривые (для разных материалов) тоже носят колебательный характер. Период колебаний заготовки лежит в пределах 145...220 мкс, причем большие периоды характерны для более деформационно-упрощающихся металлов Д16АМ и АМг6БМ. Следует оговориться, что на рис. 10 показаны значения математического ожидания параметров и доверительный интервал скоростей лежит в пределах 12...16 %. Точность определения времени значительно выше.

Совпадение характера колебаний заготовки, полученные в расчете, с экспериментальными результатами свидетельствует об адекватности математической модели реальному процессу деформации. Некоторое различие частотных параметров колебаний можно объяснить разными начальными условиями.

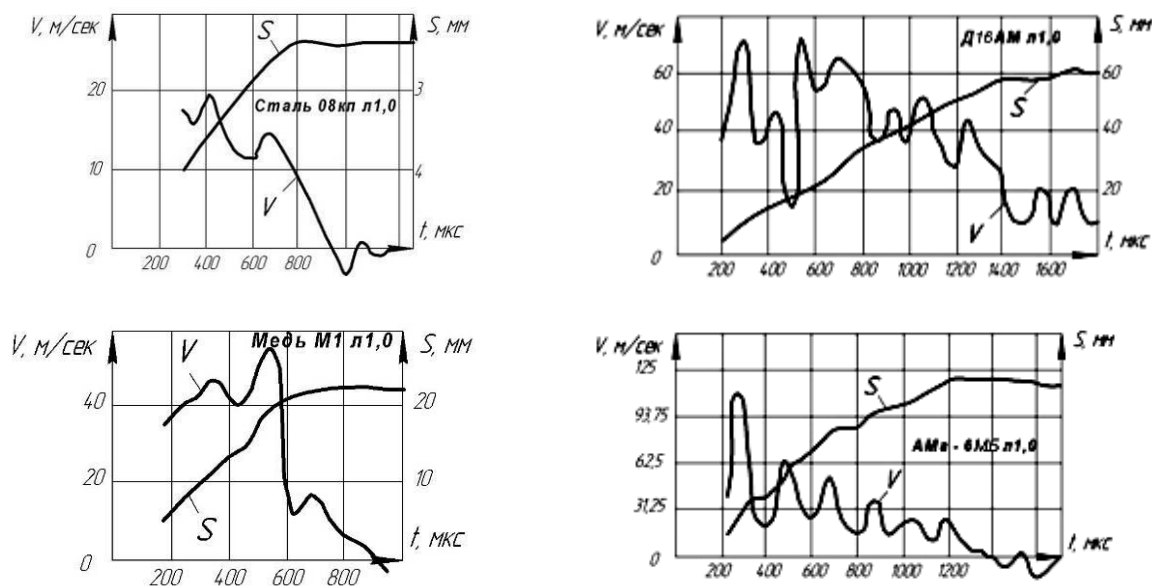


Рис. 10 – Временная зависимость скорости (V) и перемещения (S) центральной точки заготовки при центральном нагружении ЭГ- разряда (42 мкФ, $U=19 \dots 25$ кВ, межэлектродное расстояние 25 мм, длительность выделения энергии <100 мкс)

Представляет интерес временная зависимость интенсивности напряжений в заготовке, показанная для двух точек: под центральной (А) и вне центральной (В) камерами (рис. 11).

Как следует из рис. 9, 11 в рамках континуальной модели протекание процесса деформирования наблюдается его немонотонность и создаются предпосылки для реализации колебательного характера пластической деформации.

Отметим явно немонотонный характер распределения напряжений в пространстве и во времени. Это в сочетании с дополнительным внешним управляющим виброимпульсным нагружением со специально подобранной частотой может привести к проявлению некоторых положительных эффектов: релаксации остаточных напряжений, повышению пластичности материала заготовки и др. [4, 5].

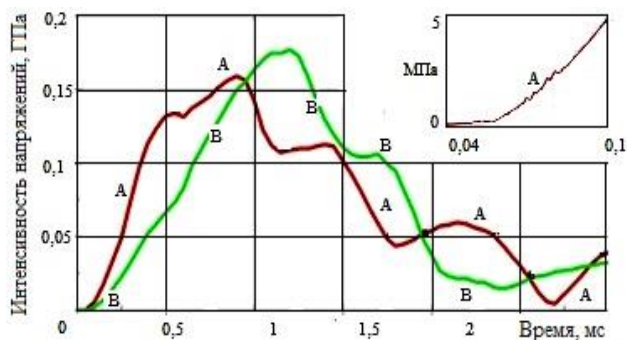


Рис. 11 – Изменение интенсивности напряжений в заготовке по времени процесса деформирования и на начальном этапе (вставка)

Выводы

1. Используемая математическая модель процесса ЭГ-штамповки адекватно описывает его в условиях нагружения заготовки с использованием двух погружных камер и возбуждаемых в них со смещением по времени действия импульсов. Адекватность модели проявляется в отражении таких важных особенностей как самопроизвольный переход волнового движения элементов в колебательный, характер колебательного движения заготовки, потеря устойчивости формы и складкообразование, развитие и взаимодействие различных ПГП.

2. Методика численной реализации модели обеспечивает исследование процессов при очень высокой степени деформации элементов технологической системы, что позволяет использовать модель и методику для исследования и параметрической оптимизации технологического процесса штамповки и технологической оснастки в соответствии с различными целевыми функциями.

3. Отмеченные количественные различия параметров, определяемых посредством моделирования и технологического эксперимента обусловлены сложной взаимосвязью разнообразных процессов, а также различием значений параметров модели и установки. Необходимо совершенствовать модель и выполнить моделирование с рациональным выбором параметров модели.

Список литературы

1. Тараненко, М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, технологические процессы [Текст]: монография в 2 ч. / М. Е. Тараненко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 272 с.
2. Нарыжный, А. Г. Вычислительная модель электрогидравлического эффекта / А. Г. Нарыжный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Х., 2012. – Вып. 54. – С. 112–124.
3. Тараненко, М. Е. Разработка ресурсосберегающих технологий и электрогидравлических процессов с пространственно-временным управлением нагружения для штамповки крупногабаритных листовых деталей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.05; защищена 13.03.05; утв. 19.10.98/Тараненко Михаил Евгеньевич. – Х., 1996 – 389 с.
4. Дідик, Р. П. Фізичні основи міцності: підручник [Текст] / Р. П. Дідик, Е. В. Кузнецов і В. М. Забара. – Д.: Наука та освіта, 2005. – 608 с.
5. Зуев, Л. Б. Микроскопическая физика пластической деформации металлов / Л. Б. Зуев // Успехи физики металлов. – 2015. Т. 16, № 1. – С. 35–60.
6. Mane T. Finite element modeling of electro-hydraulic forming of sheets [Текст] / T. Mane, V. Goel, S.D. Kore // 3rd international conference on materials processing and characterisation (ICMPC 2014), Proceedings materials science, 2014. – V. 6 – P. 105–114.
7. Atieh S. First results of SFR cavity fabrication by electro-hydraulic forming at CERN [Текст] / S. Atieh, A.A. Carvalho, I.A. Santillana et al // Proceedings of SFR 2015, Whistler, BC, Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015. – P. 1–7.
8. Bjorkstrom D. FEM simulation of electrohydraulic forming [Текст] / D. Bjorkstrom // Diploma thesis. Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan. – 2008. – 88 p.
9. Johnson G.R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [Текст] / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the 7th international symposium on ballistics. 1983. P. 541–547.

References (transliterated)

1. Taranenko M. E. Jelektrogidravlicheskaja shtampovka: torija, oborudovanie, tehprocessy : monografija v 2 ch. [Текст] / M. E. Taranenko. – Kharkiv: Nac. azerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «KHAИ», 2011. – 272 p.
2. Naryzhnyy, A. G. Vychislitel'naya model elektrogidravlicheskogo effekta / A. G. Naryzhnyy // Otkrytyye informatsionnye i kompyutemye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. Nats. aerokosmich. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «Khark. aviats. in-b». Kharkiv. – 2012. – Vyp. 54. – P. 112–124.
3. Taranenko. M. E. Razrabotka resursoberegayushchikh tekhnologiy i elektrogidravlicheskih protsessov s prostranstvenno-vremennym upravleniyem nagruzheniya dlya shtampovki krupnogabaritnykh listovykh detaley. Tekst: dis... d-ra tekhn. nauk: 05.03.05; zashchishchena 13.03.05; utv. 19.10.98/ Taranenko Mikhail Evgenyevich. – Kharkiv. 1996 – 389 p.
4. Didik R. P. Fizichni osnovy micnosti : pidruchnik [Текст] / R. P. Didik, E. V. Kuznecov i V. M. Zabara. – Dnipropetrovsk : Nauka ta osvita, 2005. – 608 p.
5. Zuyev, L. B. Mikroskopicheskaya fizika plasticheskoy deformatsii metallov / L.B. Zuyev // Uspekhi fiziki metallov. 2015. – Vol.16. No 1. – P. 35–60.
6. Mane T. Finite element modeling of electro-hydraulic forming of sheets Tekst / T. Mane, V. Goel, S.D. Kore // 3rd international conference on materials processing and characterisation (ICMPC 2014). Proceedia materials science. 2014. – V. 6 – P. 105– 114.
7. Atieh S. First results of SFR cavity fabrication by electro–hydraulic forming at CERN [Текст] / S. Atieh, A.A. Carvalho, I.A. Santillana et al // Proceedings of SFR 2015. Whistler. BC. Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015. – P. 1–7.
8. Bjorkstrom D. FEM simulation of electrohydraulic forming / D. Bjorkstrom // Diploma thesis. – Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan. 2008. – 88 p.
9. Johnson G.R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. high strain rates and high temperatures [Текст] / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the 7th international symposium on ballistics. 1983. – P. 541–547.

Поступила (received) 20.12.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Author

Тараненко Михаил Евгеньевич (Тараненко Михайло Євгенович, Taranenko Mykhaylo Ye.) – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, тел.: (057) 788-41-70, e-mail: m.taranenko@khai.edu

Нарыжный Александр Георгиевич (Нарыжний Олександр Георгійович, Naryzhny Aleksandr G.) – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, тел. (050)040-297-50, e-mail: o.naryzhnyy@khai.edu